

**ŚREDNIOFORMATOWA LUSTRZANKA CYFROWA MAMIYA ZD (21.3 MP)
– NOWY SENSOR WIZYJNY DO APLIKACJI BLISKIEGO ZASIĘGU**

**THE MAMIYA ZD (21.3 MP) MEDIUM FORMAT DSLR CAMERA
– A NEW VISION SENSOR FOR CLOSE RANGE APPLICATIONS**

Piotr Sawicki

Zakład Fotogrametrii i Teledetekcji, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie

SŁOWA KLUCZOWE: lustrzanka cyfrowa, sensor CCD, samokalibracja, metoda wiązek, dokładność, bliski zasięg

STRESZCZENIE: Badanie średnioformatowej lustrzanki cyfrowej Mamiya ZD, wyposażonej w sensor CCD (format 48×36 mm, rozdzielczość 5328×4000, piksel $p'_{HV} = 9 \mu\text{m}$), obejmowało określenie dystorsji radiometrycznej sygnału oraz dokładności samokalibracji i opracowania punktowego w bliskim zasięgu. Ocenę dystorsji sygnału sensora CCD FTF4052C przeprowadzono w autorskim programie "Image Analysis". Obrazy rejestrowane aparatem Mamiya ZD charakteryzuje wysoka jakość radiometryczna sygnału. Średnie odchylenie standardowe wyznaczonej jasności I wyniosło $\text{StdDev} = 1.1$ (R: $\text{StdDev} = 1.5$, G: $\text{StdDev} = 1.3$, B: $\text{StdDev} = 2.3$). Fotogrametryczne badanie aparatu Mamiya ZD, wyposażonego w 2 obiektywy serii Mamiya 645AF, wykonano na podstawie 3 konfiguracji zdjęć zbieżnych (17, 13, 11) pola testowego, które tworzyło ca 220 sygnalizowanych punktów, w tym 60 punktów kodowanych (kod 14 bit). Zdjęcia rejestrowano z odległości ca $Y_F = 5$ m. Automatyczny pomiar punktów na obrazach cyfrowych oraz rozwiązanie metodą wiązek, łącznie z samokalibracją, wykonano programem AICON 3D Studio. Optymalny model aproksymujący błędy systematyczne obrazu zawierał 5 parametrów: dystorsję radialną symetryczną $A_{1,2}$, dystorsję radialną asymetryczną i tangencjalną $B_{1,2}$ oraz afiniczność sensora C_1 . Najwyższą dokładność uzyskano dla konfiguracji 11 zdjęć zbieżnych. Wartość Sigma 0 po wyrównaniu wyniosła $\sigma_0 = \pm 0.055$ pxl. Parametry orientacji wewnętrznej: c_K, x'_o, y'_o wyznaczone zostały z dokładnością ± 0.15 pxl (obiektyw 645AF 45 mm) oraz ± 0.35 pxl (obiektyw 645AF 80 mm). Odchylenia standardowe RMS wyznaczonych współrzędnych X, Y, Z wyniosły odpowiednio: $S_{XZ} = \pm 0.02 \div 0.03$ mm, $S_Y = \pm 0.07$ mm oraz $S_{XZ} = \pm 0.01 \div 0.02$ mm, $S_Y = \pm 0.04$ mm. Zastosowanie lustrzanki Mamiya ZD do punktowych opracowań bliskiego zasięgu wymaga kombinowanego wyrównania metodą wiązek, połączonego z samokalibracją równoczesną *on-the-job*. Względna dokładność opracowania jest możliwa z dokładnością rzędu ca 1:125 000 (obiektyw 645AF 45 mm) oraz 1:200 000 (obiektyw 645AF 80 mm).

1. WSTĘP

Aparaty cyfrowe typu DSLR (*Digital Single Lens-Reflex Camera*) należą, ze względu na tryb pracy przetwornika cyfrowego, do grupy wizyjnych sensorów typu *still video*. Współczesne lustrzanki cyfrowe wyposażone są w przetworniki *solid state* oparte na technologii CCD (*Charge Coupled Device*) lub CMOS (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*). W ostatnich kilku latach pojawiły się sensory CCD/CMOS

nowej generacji, w których znacząco wzrosła rozdzielczość i radiometryczna jakość obrazu (większa czułość, redukcja szumów, duży zakres tonalny, stabilność barw, *antiblooming*, itd.). Jednocześnie, wzrosła szybkość zewnętrznego i wewnętrznego transferu danych oraz pojemność wewnętrznych nośników pamięci.

Aparaty typu DSLR traktowane są w fotogrametrii bliskiego zasięgu w zasadzie jako niemetryczne kamery cyfrowe. Pomimo niedostatecznej stabilności elementów orientacji wewnętrznej, przy zapewnieniu odpowiedniej techniki opracowania zdjęć, są z powodzeniem stosowane w różnorodnych wizyjnych systemach pomiarowych typu *off-line*. Systemy *off-line* są dedykowane przede wszystkim optycznej metrologii przemysłowej, inwentaryzacji inżynierskiej (*reverse engineering*), architektonicznej, diagnostyce technicznej i medycznej, itd.

Klasyfikacja oraz charakterystyka budowy, zasad działania i dokładności współczesnych cyfrowych sensorów wizyjnych stosowanych w fotogrametrii bliskiego zasięgu znajduje się we wcześniejszej pracy autora (Sawicki, 2006).

Stały rozwój technologii sensorów wizyjnych określił z jednej strony nowe potrzeby w zakresie technik kalibracji, metod przetwarzania fotogrametrycznych danych cyfrowych oraz oprogramowania, z drugiej zwiększył potencjał nowych zastosowań. Stale aktualnym zagadnieniem pozostaje zatem badanie potencjału pomiarowego fotograficznych aparatów cyfrowych (Peipe, Tecklenburg, 2006; Sawicki, 2001; Sawicki, 2003; Sawicki, Ostrowski, 2007).

Prezentowane poniżej wyniki badań profesjonalnej, wysokorozdzielczej średnioformatowej lustrzanki cyfrowej Mamiya ZD, którą wyposażono w 2 wymienne obiektywy serii Mamiya 645AF, obejmowały określenie dystorsji radiometrycznej sygnału sensora CCD, fotogrametryczną kalibrację oraz badanie dokładności opracowania punktowego w bliskim zasięgu. Zastosowana metoda badań była podobna do badań potencjału pomiarowego aparatu DSLR Kodak DCS Pro 14n (13.5 MP), które autor wykonał w 2007 r. (Sawicki, Ostrowski, 2007).

Według wiedzy autora, nie opublikowano dotychczas pracy naukowo-technicznej, włączając artykuły zawarte w Archiwum ISPRS, Vol. XXXVII, Part B5, 2008, która dotyczyłaby oceny dokładności i aplikacji aparatu DSLR Mamiya ZD.

2. CHARAKTERYSTYKA APARATU DSLR MAMIYA ZD

Profesjonalna średnioformatowa lustrzanka cyfrowa Mamiya ZD jest wyposażona w pierwszy na świecie komercyjnie zastosowany sensor CCD o wymiarach 48×36 mm. Aparat DSLR Mamiya ZD wprowadzono do sprzedaży w Polsce w 2006 r., w cenie 49 tys. zł (korpus aparatu, bez obiektywu). Badany egzemplarz lustrzanki Mamiya ZD wyposażony został w dwa wymienne obiektywy Mamiya 645AF 45 mm oraz Mamiya 645AF 80 mm. Aparat Mamiya ZD charakteryzują następujące, mające znaczenie dla fotogrametrycznej rejestracji, parametry techniczne i użytkowe:

- Przetwornik: CCD FTF4052C (architektura *Full Frame* RGB) firmy DALSA.
- Aktywny obszar przetwornika: $S_{HV} = 48.1 \times 36.1$ mm.
- Liczba pikseli: aktywna rozdzielczość matrycy: 5344×4008 pikseli (21.42 MP), efektywna rozdzielczość matrycy: 5328×4000 pikseli (21.31 MP).

- Piksel przetwornika: $p'_{HV} = 9 \mu\text{m}$.
- Czulość ISO przetwornika: ISO 50÷400; skok o 1/3 wartości.
- Konwerter A/D: 14-bit, zapis 12-bit na każdy kanał R, G, B.
- Przestrzeń kolorów: Adobe RGB, sRGB.
- Format zapisu danych: RAW (Exif 2.2), JPEG (3 rodzaje rozdzielczości: 5328×4000, 4096×3072, 3008×2256; 3 poziomy kompresji), RAW + JPEG.
- Szybkość migawki: 30÷1/4000 s.
- Auto Focus: system TTL, 3 obszary ogniskowania.
- Ogniskowanie: jednorazowe (S), ciągłe (C), ręczne (M).
- Tryby naświetlania: priorytet przysłony AE(Av), priorytet migawki AE(Tv), program AE(P), ręczny (M), tryb X/Bulb(B).
- Tryby pracy: zdjęcia pojedyncze, zdjęcia seryjne (1.2 klatki/s÷10 klatek w serii).
- Filtr wymienny: IR (standard)/Low-Pass (opcja).
- Obiektywy Mamiya 645AF: $f = 45 \text{ mm}$, F 2.8 oraz $f = 80 \text{ mm}$, F 2.8.
- Ogniskowanie: *Auto Focus*, *Manual Focus*.
- Karty pamięci: Compact Flash Typ I i II (> 256 MB), karty SD (256 MB÷2GB).
- Komunikacja z komputerem: interfejs IEEE1394 (*Firewire*) 4 pin, wyjście wideo (NTSC/PAL)

3. BADANIE DYSTORSJI SYGNAŁU SENSORA CCD FTF4052C

Badanie cech sygnału cyfrowego przetwornika CCD FTF4052C lustrzanki Mamiya ZD wykonano na podstawie sekwencji 30 zdjęć pola testowego w formie czarno-białej szachownicy (Sawicki, Ostrowski, 2007). Podczas rejestracji sensor CCD był rozgrzany do temperatury roboczej a dla aparatu zachowano niezmiennie parametry orientacji wewnętrznej i zewnętrznej. Na obrazach zdefiniowano 10 obszarów zainteresowania. Analizę obrazów cyfrowych w formacie BMP wykonano w autorskim programie "Image Analysis" (Sawicki, Ostrowski, 2007). W czterech kanałach: R, G, B oraz jasności I obliczona została średnia wartość poziomu szarości, wariancja (Var) i odchylenie standardowe (StdDev).

Na podstawie wyników badań (tabela 1) można stwierdzić, że jakość sygnału cyfrowego generowanego przez sensor CCD FTF4052C charakteryzują następujące cechy:

- Średnie wartości poziomu szarości, wariancji i odchylenia standardowego w badanych kanałach R, G, B, I dla obrazów zarejestrowanych 2. obiektywami 645AF 45 mm oraz 645AF 80 mm nie wykazują statystycznie istotnych różnic; w zastosowanej metodzie badań, ewentualna aberracja chromatyczna obiektywów nie ma wpływu na jakość sygnału cyfrowego.
- Max. wartości Var i StdDev we wszystkich badanych obszarach występują w kanale B (Var = 5.3, StdDev = 2.3), natomiast min. wartości Var i StdDev w kanale G (Var = 1.9, StdDev = 1.3); jest to efektem niskiej czulości sensora dla długości fali ok. 400 nm i najwyższej czulości sensora w zakresie fal o długościach 500÷600 nm oraz charakterystyki widmowej filtra Bayera.
- Obrazy cyfrowe charakteryzują się niskim poziomem szumów i wysoką jakością układu przetwarzającego dane; w kanale jasności I średnie odchylenie

standardowe wyniosło $\text{StdDev} = 1.1$ wartości jasności piksela (kanał R: $\text{StdDev} = 1.5$, kanał G: $\text{StdDev} = 1.3$, kanał B: $\text{StdDev} = 2.3$).

Tabela 1. Wyniki badań dystorsji cyfrowego sygnału aparatu DSLR Mamiya ZD

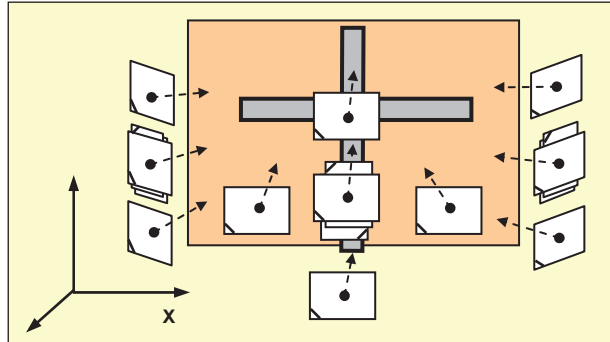
Obszar	Obiektyw 645AF 45 mm				Obiektyw 645AF 80 mm			
	Średnie jasności pikseli w badanych obszarach							
Ciemny	26.73	37.69	26.19	33.12	25.19	35.80	25.90	31.52
Jasny	181.31	219.03	194.31	204.91	182.39	221.05	198.17	206.84
Obszar	Wariancje jasności pikseli							
	R	G	B	I	R	G	B	I
Ciemny	2.20	2.87	4.44	2.07	2.16	2.91	4.71	2.10
Jasny	2.80	0.97	6.04	0.58	2.52	0.91	5.88	0.59
Obszar	Odchylenia standardowe jasności pikseli							
	R	G	B	I	R	G	B	I
Ciemny	1.46	1.66	2.08	1.41	1.45	1.68	2.14	1.42
Jasny	1.67	0.98	2.45	0.75	1.58	0.94	2.42	0.76

4. ROZWIĄZANIE TERRATRIANGULACJI ŁĄCZNIE Z SAMOKALIBRACJĄ

Badanie potencjału pomiarowego i samokalibrację średnioformatowej lustrzanki Mamiya ZD wykonano na podstawie zdjęć pola testowego Instytutu Fotogrametrii i Teledetekcji Uniwersytetu Technicznego w Dreźnie. Przestrzenne pole testowe (rys. 1) tworzyło ogółem ca 220 punktów (rys. 2), które były sygnalizowane jasnym, odbijającym światło znakiem, w tym 65 punktów kodowanych (kod 14 bit, zakres numeracji 1÷516). Sygnalizowane punkty były równomiernie rozmieszczone na pionowej ścianie oraz na przestrzennej, metalowej konstrukcji, którą tworzyła baza stereofotogrametrycznego systemu pomiarowego IMK C. Z. Jena. Pole testowe nie posiadało typowych fotopunktów o znanych współrzędnych 3D, wyznaczonych pomiarami geodezyjnymi, lecz jedynie 2 zdefiniowane odcinki skalowe.

Samokalibrację aparatu cyfrowego Mamiya ZD, systemu oraz badanie dokładności wyznaczenia punktów przeprowadzono na podstawie 3. konfiguracji zdjęć zbieżnych (17, 13, 11 zdjęć, w tym również zdjęcia obrócone wokół osi celowej w lewo i prawo o kąt ca 100 grad), wykonanych niezależnie przy użyciu obiektywów Mamiya 645AF 45 mm oraz 645AF 80 mm (rys. 1). Rejestrację pola testowego wykonano z odległości ca $Y_F = 5$ m. Warunki rejestracji i opracowania zdjęć (tabela 2) były zbliżone do praktycznego pomiaru metrologicznego w bliskim zasięgu.

Rozwiązanie terratriangulacji metodą wiązek, łącznie z samokalibracją równoczesną *on-the-job* zostało wykonane programem AICON 3D Studio, Version 7.0, firmy AICON 3D Systems GmbH (AICON, 2008). W programie AICON 3D Studio zastosowano w pełni automatyczny tryb pomiaru na zdjęciach cyfrowych wszystkich sygnalizowanych punktów (metoda *multipoint matching*), metodę swobodnego wyrównania sieci, oraz zaimplementowano 7. parametrowy model aproksymacji błędów systematycznych, stosowany dla niemetrycznych kamer i aparatów cyfrowych (Luhmann, 2003), który łączy model Browna z 1971 r. oraz model El-Hakima z 1986 r.



Rys. 1. Pole testowe i konfiguracja zdjęć cyfrowych



Rys. 2. Fragment obrazu – punkt kodowane i niekodowane

Tabela 2. Parametry rejestracji

Format obrazu	48×36 mm	
Rozdzielczość obrazu	5328×4000	
Wymiar piksela p'_{HV}	9 μm	
Format zapisu obrazu	JPEG	
Y_F	~ 5 m	
Stosunek bazowy $\nu = B / Y_F$	1/1÷1/4	
Przysłona p	22	
Czas ekspozycji t	1/125 s	
Lampa błyskowa, zewnętrzna	bez korekcji	
Obiektyw	645AF 45	645AF 80
Ogniskowa f	45 mm	80 mm
Ogniskowanie MF	~ 5 m ; ∞	~ 5 m ; ∞
1: M_Z	~ 1: 110	~ 1: 60
Wielkość piksela w terenie	~ 1.0 mm	~ 0.55 mm
Zakres fotografowania H×V	~ 5.3 × 4.0 m	~ 3.0 × 2.2 m
Pkt. niekodowane / kodowane	157 / 65	178 / 44

Program AICON 3D Studio umożliwia orientację zdjęć sieci (translacja i obrót) do układu współrzędnych obiektu za pomocą min. 5 punktów kodowanych o znanych, przybliżonych współrzędnych wyznaczonych z dokładnością ca 0.1 m. Do określenia skali układu współrzędnych wystarcza jeden znany odcinek skalowy. W badaniach, do rozwiązania sieci zdjęć przyjęto 2, niezależnie wyznaczone odległości pomiędzy kodowanymi punktami: $S_{512-514} = 1334.67$ mm oraz $S_{515-516} = 1339.94$ mm.

Program AICON 3D Studio realizuje iteracyjne, kombinowane wyrównanie metodą wiązek z dodatkowymi obserwacjami oraz parametrami modelującymi błędy systematyczne obrazu. W wyniku wyrównania wyznaczone są następujące niewiadome:

- podstawowe parametry orientacji wewnętrznej: c_K, x'_o, y'_o
- parametry dodatkowe:
 - o A_1, A_2, A_3 (dystorsja radialna symetryczną)
 - o B_1, B_2 (dystorsja radialna asymetryczna i tangencjalna)
 - o C_1, C_2 (afiniczność i nieortogonalność osi matrycy sensora)
- elementy orientacji zewnętrznej zdjęć: $\omega_i, \varphi_i, \kappa_i, X_{0i}, Y_{0i}, Z_{0i}$
- współrzędne wyznaczanych punktów: X_n, Y_n, Z_n

Ocena jakości wyrównania wykonywana jest przy zastosowaniu następujących miar oraz parametrów dokładności:

- test *data-snooping* (wartość krytyczna ca 4.425)
- Sigma 0: σ_0
- macierz korelacji dla 10. wyznaczanych parametrów orientacji wewnętrznej
- odchylenia standardowe StdDev parametrów kalibracji po wyrównaniu: $sc_K, sx'_o, sy'_o, sA_1, sA_2, sA_3, sB_1, sB_2, sC_1, sC_2$
- odchylenia standardowe współrzędnych punktów: sX_n, sY_n, sZ_n oraz dodatkowo wartości RMS: S_X, S_Y, S_Z

4.1. Analiza wyników badań aparatu Mamiya ZD

Badanie potencjału pomiarowego aparatu Mamiya ZD przeprowadzono na podstawie serii zdjęć wykonanych niezależnie przy użyciu obiektywów Mamiya 645AF 45 mm oraz 645AF 80 mm, ogółem w 36. wariantach, wprowadzając do obliczeń kolejno:

- konfigurację 17, 13, 11 zdjęć zbieżnych w dwóch wariantach, dla których ogniskowanie obiektywu wykonano ręcznie na odległość „5 m” („MF 5”) oraz na „nieskończoność” („MF ∞ ”)
- 7, 6, 5 dodatkowych parametrów kalibracji

W badanych wariantach wyrównania metodą wiązek odchylenia standardowe StdDev wyznaczonych współrzędnych X, Y, Z, zależą od konfiguracji geometrycznej i liczby zdjęć, natomiast nie zależą od liczby parametrów dodatkowych wprowadzonych do wyrównania, które aproksymują błędy systematyczne obrazu.

Wyznaczony optymalny model kalibracji zawierał 5 parametrów dodatkowych: A_1, A_2, B_1, B_2, C_1 korekcji błędów. Parametry A_3 oraz C_2 okazały się statystycznie nieistotne (w analizie zastosowano rozkład Studenta). Poza tym parametry A_2 i A_3 były bardzo mocno skorelowane (współczynnik korelacji $0.97 \div 0.98$).

Przy wyrównaniu terratriangulacji zdjęć wykonanych obiektywem 645AF 45 mm, najwyższą dokładność uzyskano dla konfiguracji 11. zdjęć zbieżnych, ogniskowanych w trybie „MF 5 m” oraz przy 5. parametrach dodatkowych (wariant 45_Y5_05_11). Odchylenia standardowe RMS określonych współrzędnych wyniosły odpowiednio: $S_X = \pm 0.03$ mm, $S_Y = \pm 0.07$ mm, $S_Z = \pm 0.02$ mm (tabela 2). Przy wyrównaniu sieci zdjęć ogniskowanych na wartość „MF ∞ ” otrzymano StdDev większe średnio

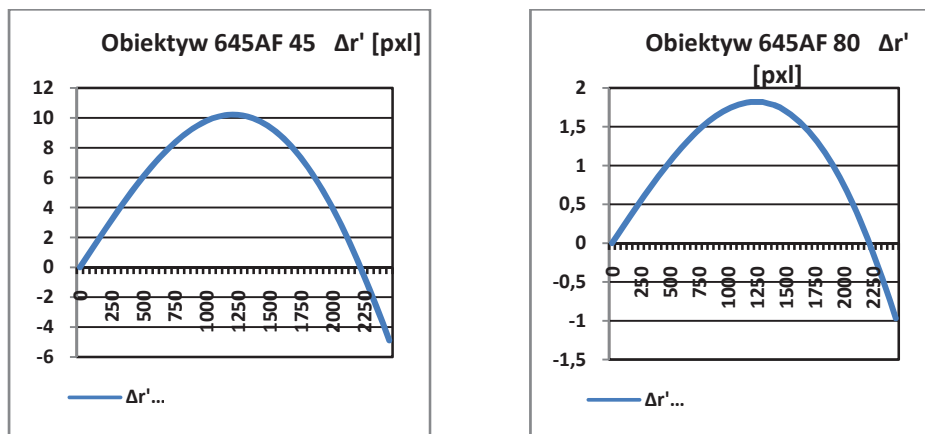
o $0.01 \div 0.02$ mm. W konfiguracji 17 zdjęć zbieżnych otrzymano odchylenia standardowe odpowiednio: $S_X = \pm 0.11$ mm, $S_Y = \pm 0.095$ mm, $S_Z = \pm 0.03$ mm.

Przy wyrównaniu sieci zdjęć wykonanych obiektywem 645AF 80 mm najwyższą dokładność uzyskano również dla konfiguracji 11. zdjęć zbieżnych, ogniskowanych w trybie „MF 5 m” oraz przy 5. parametrach dodatkowych (wariant 80_Y5_05_11). Odchylenia standardowe RMS wyznaczonych współrzędnych wyniosły odpowiednio: $S_X = \pm 0.02$ mm, $S_Y = \pm 0.04$ mm, $S_Z = \pm 0.01$ mm (tabela 2). Przy wyrównaniu sieci zdjęć ogniskowanych na wartość „MF ∞ ” otrzymano takie same wartości odchyleń standardowych. W konfiguracji 17 zdjęć zbieżnych otrzymano odchylenia standardowe odpowiednio: $S_X = \pm 0.05$ mm, $S_Y = \pm 0.05$ mm, $S_Z = \pm 0.02$ mm.

W najkorzystniejszym pod względem dokładności wariacie wyrównania 45_Y5_05_11, podstawowe parametry orientacji wewnętrznej: c_K , x'_o , y'_o określone zostały ze średnią dokładnością ± 0.15 pxl (tabela 2). Te same dokładności otrzymano również dla zespołu zdjęć ogniskowanych trybem „MF ∞ ”. Wyniki samokalibracji (11 zdjęć, 5 parametrów) na podstawie zdjęć ogniskowanych w opcji „MF 5 m” oraz „MF ∞ ” różniły się następująco: dla stałej kamery $\Delta c_K = -22.9$ pxl, natomiast dla punktu głównego: $\Delta x'_o = +0.3$ pxl oraz $\Delta y'_o = +0.5$ pxl.

W najkorzystniejszym pod względem dokładności wariacie wyrównania 80_Y5_05_11, podstawowe parametry orientacji wewnętrznej: c_K , x'_o , y'_o wyznaczone zostały ze średnią dokładnością ± 0.35 pxl (tabela 2). Zbliżone dokładności otrzymano dla zespołu zdjęć ogniskowanych w opcji „MF ∞ ”. Wyniki samokalibracji (11 zdjęć, 5 parametrów) na podstawie zdjęć ogniskowanych w trybie „MF 5 m” oraz „MF ∞ ” różniły się o następujące wartości: dla stałej kamery $\Delta c_K = +219$ pxl, natomiast dla położenia punktu głównego: $\Delta x'_o = -5.7$ pxl oraz $\Delta y'_o = -1.6$ pxl.

Max. wartość sumarycznej poprawki dystorsji radialnej symetrycznej dla promienia radialnego $r' = 1200$ pxl wyniosła $\Delta r' = 10.21$ pxl (obiektyw 645AF 45 mm) oraz $\Delta r' = 1.82$ pxl (obiektyw 645AF 80 mm). Dla krzywych dystorsji radialnej (rys. 3) przyjęto drugi punkt zerowy o wartości $R_0 = 2222$ pxl ($R_0 = 20$ mm)



Rys. 3. Wykresy krzywych dystorsji radialnej obiektywów 645AF 45 oraz 645AF 80

We wszystkich wariantach wyrównania metodą wiązek układ równań poprawek był silnie nadokreślony. W wariancie 45_Y5_05_11 liczba obserwacji wyniosła $n = 3318$, niewiadomych $u = 662$, redundancja $r = 2656$, natomiast w wariancie 80_Y5_05_11 liczba obserwacji wyniosła $n = 2546$, niewiadomych $u = 599$, redundancja $r = 1947$. Wartość Sigma 0 otrzymano odpowiednio $\sigma_0 = \pm 0.053$ pxl oraz $\sigma_0 = \pm 0.055$ pxl. W obu wariantach wyrównania max. poprawka V_{xy} do współrzędnych tłowych wyniosła 0.2 pxl.

Tabela 3. Wyniki wyrównania dla zdjęć wykonanych obiektywem 645AF 45 mm oraz 645AF 80 mm (2 warianty o najwyższej dokładności wyrównania)

Parametry kalibracji / StdDev, V_{xy}	Wariant wyrównania			
	45_Y5_05_11		80_Y5_05_11	
σ_0 [mm]	0.000476		0.000496	
c_K / sc_K [mm]	-45.6151	0.001627	-81.71510	0.002707
x'_o / sx'_o [mm]	-0.05115	0.001324	-0.22473	0.003753
y'_o / sy'_o [mm]	0.23708	0.001289	0.23491	0.002900
A_1 / sA_1	-3.96719e-005	6.85691e-008	-6.4106e-006	5.26034e-008
A_2 / sA_2	1.865e-008	7.26381e-011	-2.05162e-009	5.57842e-011
A_3 / sA_3	0	fix	0	fix
B_1 / sB_1	7.35683e-006	1.87189e-007	1.25961e-006	1.79674e-007
B_2 / sB_2	-4.97886e-006	1.80774e-007	-2.89928e-006	1.36597e-007
C_1 / sC_1	0.00114957	3.23352e-006	0.00114501	3.16170e-006
C_2 / sC_2	0	fix	0	fix
S_X [mm]	0.026		0.020	
S_Y [mm]	0.074		0.042	
S_Z [mm]	0.022		0.013	
V_{xy} [mm]	0.00181	0.00183	-0.00157	0.00194

5. PODSUMOWANIE, WNIOSKI

Obrazy rejestrowane średnioformatową lustrzanką cyfrową Mamiya ZD, która jest wyposażona w sensor CCD FTF4052C (format 48×36 mm, rozdzielczość 5328×4000), charakteryzuje niski poziom szumów i wysoka jakość układu przetwarzającego dane. Średnie odchylenie standardowe jasności I wynosi StdDev = 1.1 (kanał R: StdDev = 1.5, kanał G: StdDev = 1.3, kanał B: StdDev = 2.3).

Badanie potencjału pomiarowego aparatu Mamiya ZD przeprowadzono na podstawie niezależnych, wielokrotnych zdjęć zbieżnych pola testowego, wykonanych przy użyciu 2. obiektywów Mamiya 645AF 45 mm oraz 645AF 80 mm. Charakterystyka obiektu testowego, warunki rejestracji i pomiaru zdjęć oraz wyrównania metodą wiązek były zbliżone do parametrów typowego fotogrametrycznego opracowania metrologicznego w bliskim zasięgu.

Automatyczny pomiar zdjęć metodą *multipoint matching* i wyrównanie metodą wiązek łącznie z samokalibracją wykonano programem AICON 3D Studio. Na podstawie 36. wariantów wyrównania zbadano empirycznie wpływ liczby i rodzaju

dotychczasowych parametrów modelujących błędy systematyczne obrazu oraz wpływ konfiguracji zdjęć zbieżnych i sposobu ogniskowania na dokładność samokalibracji i estymacji współrzędnych punktów.

Optymalny model aproksymujący błędy systematyczne obrazu zawierał 5 parametrów: dystorsję radialną symetryczną $A_{1,2}$, dystorsję radialną asymetryczną i tangencjalną $B_{1,2}$ oraz afiniczność sensora C_1 . Dokładność pozycjonowania punktów nie zależała w istotny sposób od liczby parametrów kalibracji. Najwyższą dokładność rozwiązania uzyskano dla konfiguracji 11 zdjęć zbieżnych.

Wartość σ_0 po wyrównaniu metodą wiązek wyniosła $\sigma_0 = \pm 0.055$ pxl. Podstawowe parametry orientacji wewnętrznej: c_K, x'_o, y'_o określone zostały ze średnią dokładnością ± 0.15 pxl (dla zdjęć wykonanych obiektywem 645AF 45 mm) oraz ± 0.35 pxl (przy zastosowaniu obiektywu 645AF 80 mm). Odchylenia standardowe RMS wyznaczonych współrzędnych wyniosły odpowiednio: $S_X = \pm 0.03$ mm, $S_Y = \pm 0.07$ mm, $S_Z = \pm 0.02$ mm oraz $S_X = \pm 0.02$ mm, $S_Y = \pm 0.04$ mm, $S_Z = \pm 0.01$ mm. Względna dokładność opracowania punktowego jest zatem możliwa z dokładnością rzędu ca 1: 125 000 (obiektyw 645AF 45 mm) oraz 1: 200 000 (obiektyw 645AF 80 mm).

Zastosowanie aparatu DSLR Mamiya ZD do punktowych opracowań bliskiego zasięgu wymaga rejestracji wielokrotnych zdjęć zbieżnych obiektu oraz kombinowanego wyrównania metodą wiązek, połączonego z samokalibracją równoczesną *on-the-job*. Metoda samokalibracji równoczesnej *on-the-job* niemetrycznych aparatów cyfrowych najdokładniej odpowiada rzeczywistym warunkom rejestracji zdjęć i zapewnia optymalny model funkcjonalny wyrównania metodą wiązek.

6. LITERATURA

AICON, 2008. User manual. <http://www.aicon.de>

Luhmann T., 2003. *Nahbereichsphotogrammetrie - Grundlagen, Methoden und Anwendungen*. Wichman Verlag, Heidelberg.

Peipe J., Tecklenburg W., 2006. Vergleich von Softwaretools zur Kamerakalibrierung. *Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik*. Wichmann Verlag, Heidelberg, s. 106-111.

Sawicki P., 2001. Rozwiązanie terratriangulacji łącznie z samokalibracją połową aparatu cyfrowego Kodak DC4800. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, Vol. 11, s. 3/25-3/32.

Sawicki P., 2003. Kalibracja równoczesna aparatu cyfrowego Kodak DC4800 w procesie fotogrametrycznego pomiaru punktów w bliskim zasięgu. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, Vol. 13, s. 457-466.

Sawicki P., 2006. Współczesne cyfrowe sensory wizyjne w fotogrametrii bliskiego zasięgu. *Geodezja - Półrocznik AGH w Krakowie*, Tom 12, Zeszyt 2/1, s. 397-406.

Sawicki P., Ostrowski B., 2007. Badanie potencjału pomiarowego aparatu cyfrowego typu SLR Kodak DCS Pro 14n (13.5 MP). *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, Vol. 17, s. 729-738.

Składam podziękowanie dr. inż. Jakubowi Szulwiczowi z Zakładu Geodezji Politechniki Gdańskiej za wypożyczenie do badań aparatu DSLR Mamiya ZD oraz prof. Hansowi-Gerdowi Maas i dr. inż. Danilo Schneider z Instytutu Fotogrametrii i Teledetekcji Uniwersytetu Technicznego w Dreźnie za udostępnienie pola testowego i programu AICON 3D Studio.

THE MAMIYA ZD (21.3 MP) MEDIUM FORMAT DSLR CAMERA – A NEW VISION SENSOR FOR CLOSE RANGE APPLICATIONS

KEY WORDS: DSLR camera, CCD sensor, self-calibration, bundle adjustment, accuracy, close range

Summary

Quality of the radiometric signal, measuring potential, and the photogrammetric self-calibration of the Mamiya ZD medium format digital SLR camera were studied. The DSLR Mamiya ZD camera examined was equipped with 2 exchangeable objectives: Mamiya 645AF 45 mm and 645AF 80 mm.

The noise level and the signal distortion in the CCD FTF4052C sensor (format size of 48×36 mm, full resolution of 5328×4000) was determined with "Image Analysis" software developed by the author. Analysis of 30 image sequences showed the Mamiya ZD camera to be characterised by a low noise level and a high quality of data processing module. In the brightness channel I, the mean standard deviation amounted to StdDev = 1.1 (channel R: StdDev = 1.5; channel G: StdDev = 1.3; channel B: StdDev = 2.3).

The photogrammetric research was conducted in the test field at Institute of Photogrammetry and Remote Sensing, Dresden University of Technology. The test field consisted of a total of 220 signalised, retro-reflective points (60 coded points, 14 bit code). The test field was registered from the distance of ca $Y_F = 5$ m. The camera was calibrated and point determination accuracy was examined based on 3 types of digital image networks which consisted of configurations of 17, 13, and 11 convergent photos.

The bundle adjustment, including on-the-job self-calibration with additional parameters for modelling systematic imaging errors, was carried out with the AICON 3D Studio software package (AICON 3D Systems GmbH, Germany). The correction terms contained additional parameters for compensation of radial-symmetric ($A_{1,2,3}$) and decentering ($B_{1,2}$) lens distortion as well as affinity and shear of the digital image coordinate system ($C_{1,2}$). Additional parameters were implemented in individual calibrations (7, 6, 5). All the points in the digital images were measured fully automatically with the AICON 3D Studio program.

The study showed the highest 3D point positioning accuracy to be achieved with 11 convergent photos. The optimal model of systematic errors consisted of 5 parameters ($A_{1,2}$, $B_{1,2}$, C_1). The point accuracy was independent of the number of calibration parameters.

After the combined bundle adjustment with the self-calibration, the Sigma 0 mean value amounted to $\sigma_0 = \pm 0.055$ pxl. The basic parameters of interior orientation: c_K , x'_o , y'_o were determined with the accuracy of ± 0.15 (for the photos registered with 645AF 45 mm objective) and ± 0.35 pxl (for the 645AF 80 mm objective). The RMS standard deviation of calculated coordinates amounted to: $S_X = \pm 0.03$ mm, $S_Y = \pm 0.07$ mm, $S_Z = \pm 0.02$ mm and $S_X = \pm 0.02$ mm, $S_Y = \pm 0.04$ mm, $S_Z = \pm 0.01$ mm, respectively. In the close range test application presented, using the Mamiya ZD medium format DSLR camera, the relative accuracies of 3D coordinate analytical estimates achieved in the object space were 1:125 000 (for the photos registered with 645AF 45 mm objective) and 1:200 000 (645AF 80 mm objective).

dr inż. Piotr Sawicki
e-mail: piotr.sawicki@geodezja.pl
tel. +89 5233282